光ソリトンの性質を利用した全光可変遅延線とそのシステム応用

丸田 章博

大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

All-Optical Tunable Delay Line Using Optical Soliton's Feature and Its System Application

Akihiro MARUTA

Graduate School of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871

(Received March 11, 2009)

Optical buffers are indispensable subsystems for implementing optical packet routers. Recently tunable optical delay lines based on slow light in optical fibers have been actively studied for application to optical buffers. The combination of tunable delay lines and wavelength conversion is highly effective for contention resolution. We recently proposed all-optical tunable delay lines using optical soliton's peculiar features exhibited in optical fibers. In this paper, we review the proposed all-optical tunable delay line that consists of a wavelength conversion based on soliton self-frequency shift and a filtering supercontinuum spectrum. We also introduce a non-integer ratio bit rate converter based on soliton collision as a system application of an all-optical tunable delay line.

Key Words: Optical fiber, Optical buffer, Optical delay line, Fiber nonlinearity, Optical soliton

1. はじめに

より高速で大容量の光ネットワークを実現するために、光/電気/光変換を介さずに、データをやり取りする全光ネットワークの実現が強く望まれている。そのようなネットワークでは、光のままでデータのスイッチングを行う光ルータが必要となる。光バッファは光パケットの衝突を回避するために必須であり、光ルータの実現に欠かせないサブシステムである。一方で、光ランダムアクセスメモリ(Random Access Memory: RAM)の実現が難しいために、現在でも光バッファの開発は十分とは言えない。近年、光可変遅延線(Tunable Delay Line: TDL)を用いて光バッファを実現するための研究が盛んに行われている。これまでに誘導ブリルアン散乱(Stimulated Brillouin Scattering: SBS)¹⁾、誘導ラマン散乱(Stimulated Raman Scattering: SRS)²⁾、光パラメトリック増幅(Optical Parametric Amplification: OPA)³⁾、ソリトン衝突⁴⁾などを用いた光可変遅延線が提案されているが、波形歪みを伴うこと、利用できる帯域幅が狭いこと、あるいは遅延量が少ないことなどの改善を要する点がある。また、波長変換とファイバの分散を利用した方法⁵⁻⁷⁾も提案されているが、SBS、SRS、OPAおよびソリトン衝突を用いた技術と比較して構成が複雑になるという欠点がある。最近、我々は、光ファイバ中でのソリトン自己周波数シフト(Soliton Self-Frequency Shift: SSFS)を用いた全光可変

遅延線を提案した⁸⁾。一方、パケット衝突を回避する方法として、光バッファ以外に、波長変換を用いる方法がある⁹⁾。波長変換によるパケット衝突回避の利点は、遅延が少ないことである。しかし、使用可能な波長数に制限があることを考慮しなければならない¹⁰⁾。そこで、光可変遅延線と波長変換を併用することで、ルータ中でのパケット衝突を大きく低減することができ、高効率のルーティングが可能になると考えられる。本稿では、SSFSとスーパーコンティニューム(Supercontinuum: SC)光のフィルタリングを用いる、波長変換機能を有する全光可変遅延線を紹介する。また、全光可変遅延線のシステム応用として、ソリトン衝突を用いた全光ビットレート変換器¹¹⁾について紹介する。

2. 波長変換機能を有する全光可変遅延線の原理

光パルスを、異常分散値をもつファイバ(Anomalous Dispersion Fiber: ADF)に入射する場合について考える。この光パルスのパルス幅が1 ps以下であると仮定すると、ADFを伝搬するパルスの振る舞いは次式によって記述できる。

$$i \frac{\partial E}{\partial z} - \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \nu |E|^2 E = -i\gamma E + i \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 E}{\partial t^3} + \nu t_R \frac{\partial |E|^2}{\partial t} E \quad (1)$$

ここで、 z は伝搬距離、 t は群速度で移動する時間、 $E(z, t)$ ($|E|^2$)は電界の複素包絡線振幅である。また、

$$\beta_2 = -\frac{\lambda^2 D}{2\pi c} : \text{群速度分散},$$

$$\beta_3 = \frac{(S\lambda + 2D)\lambda^3}{(2\pi c)^2} : \text{三次分散},$$

$$\nu = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}} : \text{非線形係数},$$

t_R : ラマン応答時間,

$$\gamma = \frac{\log_e 10}{20} \alpha : \text{ファイバ損失}$$

であり、 λ , D , S , n_2 , A_{eff} , α はそれぞれ波長、分散パラメータ、分散スロープ、非線形屈折率、実効コア断面積、損失係数を表す。また、 c は真空中における光速である。ADFでは $D > 0$ であるので、 $\beta_2 < 0$ である。(1)式のソリトン解を

$$E(z, t) = \sqrt{\frac{|\beta_2|}{\nu}} \eta(z) \text{sech}[\eta(z)\{t - t_0(z)\}] \exp\{-i\Delta\omega(z)t + i\theta(z)\}, \quad (2)$$

と表すことにしよう。ここで、 $\sqrt{|\beta_2|/\nu} \eta(z)$, $\Delta\omega(z)$, $t_0(z)$, $\theta(z)$ はそれぞれソリトンの振幅、周波数、時間位置、位相を表す。(2)式の解を仮定して(1)式に摂動法^[2]を適用し、さらに、 $z=0$ における初期値を $\eta(z=0) = 1/\tau_s$, $\Delta\omega(z=0) = t_0(z=0) = 0$ とすると、

$$\begin{aligned} \eta(z) &= \frac{1}{\tau_s} \exp(-2\gamma z), \\ \Delta\omega(z) &= \frac{t_R \beta_2}{15\gamma \tau_s^4} [1 - \exp(-8\gamma z)], \\ t_0(z) &= \frac{t_R \beta_2^2}{120\gamma^2 \tau_s^4} [8\gamma z - 1 + \exp(-8\gamma z)] \\ &\quad + \frac{\beta_3}{7200\gamma^3 \tau_s^2} \left\{ 300\gamma^2 [1 - \exp(-4\gamma z)] + \frac{t_R^2 \beta_2^2}{\tau_s^6} \right. \\ &\quad \left. [16\gamma z - 3 + 4\exp(-8\gamma z) - \exp(-16\gamma z)] \right\}, \end{aligned} \quad (3)$$

を得る。ここで、 $\tau_s = t/2 \log_e(\sqrt{2}+1) = t/1.763$ であり、 t_s は入射パルスの幅である。 $\gamma=0$, $\beta_3=0$ の場合、(3)式は

$$\begin{aligned} \eta(z) &= \frac{1}{\tau_s}, \\ \Delta\omega(z) &= \frac{8t_R \beta_2}{15\tau_s^4} z, \\ t_0(z) &= \frac{4t_R \beta_2^2}{15\tau_s^4} z^2, \end{aligned} \quad (4)$$

となる。よって、ソリトンの振幅 η は一定であり、周波数のシフト量は z および η^4 、つまり伝搬距離とソリトンのピーク電力の2乗に比例することがわかる。この現象はソリトン自己周波数シフト(SSFS)と呼ばれている^[13,14]。さらに、時間位置もまたソリトンのピーク電力の2乗に依存して変化する。よって、ソリトンのピーク電力を変えることにより、遅延量を変化させることができる。

Fig. 1に波長変換機能を有する全光可変遅延線の概略

Fig. 1 Schematic diagram of all-optical tunable delay line accompanied with wavelength conversion.

を示す。その構成は2段階に分かれている。1段階目では、中心周波数が ω_0 である光パルスのピーク電力を強度変調器(Intensity Modulator: IM)を用いて調整し、その後、光パルスをADFに入射する。パルス幅が1 ps以下の超短パルスであると仮定すると、ADF中でSSFSによりパルスの中心周波数が $\Delta\omega$ だけ赤色シフトし、中心周波数が ω_s となる。これに伴い光パルスは Δt だけ遅延する。遅延量は入力パルスのピーク電力の2乗に比例するため、IMで入力パルスのピーク電力を調整することにより、任意の遅延量を得ることができる。2段階目では、SCによるスペクトル拡がりを生じさせるために正常分散値をもつ分散フラットファイバ(Normal Dispersion Flattened Fiber: NDFF)に光パルスを入射する。NDFFの出力端で、拡がったSCスペクトルをアレイ導波路形回折格子(Arrayed Waveguide Grating: AWG)を用いてさまざまな周波数成分に切り分け、光スイッチ(Optical Switch: OSW)を用いて所望の周波数成分のみを切り出す。再びAWGによって結合し、最終的に Δt 遅延した所望の中心周波数をもつ光パルスを得る。提案する構成で用いるIMやOSWは、非線形ループミラーやLN変調器などにより実現できる。

3. 単一パルスに対する原理確認実験

波長変換機能を有する全光可変遅延線の実験系をFig. 2に示す。ファイバレーザー(Fiber Laser: FL)から出

Fig. 2 Experimental setup for all-optical tunable delay line accompanied with wavelength conversion.

Table 1 Fiber Parameters of HNLF and NDFF at 1550 nm used in the experiment.

Parameter	HNLF	NDFF
Dispersion [ps/nm/km]	2.2	- 1.93
Dispersion Slope [ps/nm ² /km]	0.032	- 0.001
Nonlinearity [1/W/m]	12	3.9
Loss [dB/km]	0.59	0.24
Length [km]	2.4	1.5

射した中心波長1545 nm, 繰り返し周波数25 MHz, パルス幅0.5 psのガウス形光パルスを高非線形ファイバ(Highly Nonlinear Fiber: HNLF)に入射する。このとき, 入力パルスのピーク電力を可変光減衰器(Variable Optical Attenuator: VOA)によって変化させる。HNLF中でSSFSによって波長シフトおよび時間遅延の生じた光パルスを, SC光の発生に十分な光電力を得るために, エルビウム添加光ファイバ増幅器(Erbium Doped Fiber Amplifier: EDFA)で増幅した後, NDFFに入射する。NDFFの出力端で, SCスペクトルを帯域幅5 nmの光帯域通過フィルタ(Optical Band Pass Filter: OBPF)で切り出す。このとき, 中心波長は1525 nmから1565 nmまで変化させた。HNLFとNDFFのパラメータをTable 1に示す。NDFFで生じる周波数チャープを補償するために, OBPFでフィルタリングを行った後に, 群遅延量2.5または3.0 ps/nmの分散補償ファイバ(Dispersion Compensation Fiber: DCF)に光パルスを入射する。最後に, DCFから出射した光パルスを50 GHzの帯域幅を持つ光検出器(Photo Detector: PD)で光/電気変換し, その波形をサンプリングオシロスコープ(Sampling Oscilloscope: OSC)で観測した。

Fig. 3 (a)に, HNLFへの入力ピーク電力が2.5, 4, 5 Wの場合の, DCFの出力端において観測された時間波形を示す。OBPFの中心波長は1560 nm, DCFの群遅延量は2.5 ps/nmである。ただし, OSCにより観測した光パルスのパルス幅は実験で用いたPDの帯域制限により, 実際のパルス幅より広がっている。Fig. 3 (a)から, 入力ピーク電力を2.5 Wから5 Wに増加させるに従い, 遅延量が増加していることがわかる。また, いずれの入力ピーク電力においても大きな波形劣化が生じていないことが分かる。なお, 波形の右裾に見られる振動成分は, FLからの出射パルスを直接OSCで観測した場合にも見られるため, PDおよびOSCでの帯域制限に起因するものと考えられる。Fig. 3 (a)中の挿入図は自己相関計(Autocorrelator: AC)で観測した自己相関波形である。ペDESTAL成分は観測されず, 波形劣化なしに光パルスを遅延できていることが分かる。Fig. 3 (b)に, Fig. 3 (a)に対応するスペクトルを示す。点線と実線はそれぞれHNLFの入力端とDCFの出力端において観測されたスペクトルを表す。いずれの入力ピーク電力に対しても, 中心波長1560 nmに波長変換されていることが分かる。

Fig. 4に, OBPFの中心波長を1560 nmとし, 入力ピーク電力を変化させた場合の, 出力パルスの遅延量の変化を示す。白丸と破線はそれぞれ実験結果と(1)式を数値的に解いて得られた結果である。数値計算では, 実験と同じファイバパラメータとHNLFへの入射光パルスのパラメータを用いている。なお, ラマン応答時間 t_R は3 fsとした。実験で得られた最大遅延量は15.6 psであった。よって, パルス幅0.5 psに対する最大遅延量の比は31.2である。また, Fig. 4に示すとおり, 実験とシミュレーションの結果はよく一致している。Fig. 5に, 入力ピーク電力を2.5 W, 中心波長を1545 nmとした場合の出力パルスの遅延時間位置を基準時間(遅延量=0)とした時の, 各中心波長における遅延量を示す。1525 nmから

(a) Temporal waveforms and autocorrelation traces

(b) spectra

Fig. 3 Temporal waveforms, autocorrelation traces, and spectra observed at the output of DCF.

Fig. 4 Delay versus input peak power.

Fig. 5 Delay range for various center wavelengths.

1565 nmまでの波長変換と同時に、それぞれの中心波長において平均で14.4 psの時間遅延を観測することに成功した。異なる中心波長間で遅延時間に差が生じる原因は、DCF通過後の残留周波数チャープによる時間シフトである。実際のシステムでは、AWGによるフィルタリング後に各中心波長で適切な遅延量を組み込むことでこの時間差を補償することができる。

4. 10 Gbit/sでデータ変調されたRZパルス列に対する全光可変遅延実験

次に、10 Gbit/s、符号長 $2^{31}-1$ の擬似乱数ビット列(Pseudo Random Bit Sequence: PRBS)に対する全光可変遅延動作の実験的検証を行った¹⁵⁾。パルスの圧縮・伸長を付加した全光可変遅延線の概略をFig. 6に示す。中心周波数 ω_0 のデータ変調された入力パルスを、くし型プロファイルファイバ(Comb-like Profiled Fiber: CPF)¹⁶⁾を用いてパルス圧縮した後、IMで入力ピーク電力を調節し、

ADFに入射する。SSFSによりパルスの中心周波数は ω_s に赤方シフトし、同時に Δt の時間遅延を得る。周波数シフト量は入力ピーク電力の2乗に比例するため、IMを用いてADFへの入力電力を調節することで、任意の時間遅延を得ることができる。遅延したパルスをパルス伸長器に入射することで、入力パルス幅と同じパルス幅をもつ時間遅延したパルスを得ることができる。

Fig. 7に実験系を示す。繰り返し周波数10 GHzのモードロックレーザ(Mode-Locked Laser Diode: MLLD)から中心波長1545 nm、パルス幅2.0 psのパルス列が出射する。パルス列をLN強度変調器(LN-IM)とパルスパターン発生器(Pulse Pattern Generator: PPG)を用いて10 Gbit/s、符号長 $2^{31}-1$ のPRBS信号に変換する。データ変調されたパルス列をEDFAで増幅し、CPFに入射することで、パルス幅を0.4 psまで圧縮する。CPFへの入射平均電力は17.8 dBmである。VOAでピーク電力を調節し、HNLFに入射しSSFSを発生させて時間遅延を得る。パルス幅を元に戻すために、群遅延量 -3.0 ps/nmのDCFに入射する。このとき、DCF出力でのパルスの幅は5.0 psであった。入射平均電力を12.6 dBmとした場合、10.6 dBmのときのパルスの時間位置を基準として、DCF出力において10.0 psの時間遅延が得られた。Fig. 8に遅延量を変化させたときのビット誤り率(Bit Error Rate: BER)とアイパターンを示す。遅延量に関わらず、エラーフロアは確認されず、良好なアイパターンが得られていることが分かる。10.0 psの時間遅延に対して、受信電力 -25.5 dBmでエラーフリー動作($BER = 10^{-9}$)を確認した。

Fig. 6 Schematic diagram of all-optical tunable delay line associated with pulse compression and decompression.

Fig. 7 Experimental setup for all-optical tunable delay line associated with pulse compression and decompression.

Fig. 8 BER curves and eye-patterns for different delays.

5. ソリトン衝突による時間シフトを利用した全光ビットレート変換

最後に、ソリトン衝突を用いた全光可変遅延線⁴⁾のシステム応用として、全光ビットレート変換器¹¹⁾を紹介しよう。将来の全光ネットワークにおいては、種々の誤り訂正 (Forward Error Correction: FEC) 技術の利用による訂正ビット数の違いにより、わずかにビットレートの異なる信号が混在することが考えられる。ネットワーク間をビットレート無依存で接続するためには、光ノードにおいて、入力信号を光信号のまま任意のビットレートに変換する技術が重要となる。また、現在のFECエンコーダ (デコーダ) では、光/電気変換を介しているため、FECの処理速度は光信号の伝送速度に比べると低速である。そこで、光信号のままFEC処理を行う光FECの実現が期待されており¹⁷⁾、光FEC処理の実現のためにはビットレート変換技術が必要不可欠である。これまでの全光ビットレート変換は、光時分割多重 (Optical Time Division Multiplexing: OTDM) 信号に対する多重化/多重分離技術としての研究開発が行われてきた。しかし、信号を任意のビットレートに変換することができる技術は未だ実現されていない。ところで、異なる周波数を持つソリトン同士が衝突する際、衝突前後で時間波形および中心周波数は変化しないが、衝突中の相互位相変調 (Cross Phase Modulation: XPM) によってソリトンの時間位置がシフトする現象がある。時間シフト量はソリトン

パルスの振幅差、周波数差、衝突回数に依存する⁴⁾。この現象を利用して全光ビットレート変換器を実現することができる。

Fig. 9に全光ビットレート変換の原理図を示す。パルス間隔が t_0 、波長 λ_s の3つの信号光パルスの間にパルス間隔 t_0 、波長 λ_c の3つの制御光パルス配置する。両者を光カプラ (Optical Coupler: OC) で合波後、ADFに入射する。 $\lambda_s < \lambda_c$ の場合、信号光パルスが制御光パルスを追い抜くように衝突し、衝突回数に応じた時間シフトが発生する。このとき、後方の信号光パルスは3つの制御光パルスと衝突し、その時間シフト量を $3\Delta t$ とすると、真ん中のパルスは2つの制御光パルスと衝突するので $2\Delta t$ 、前方のパルスは1つの制御光パルスと衝突するので Δt の時間シフトが生じる。ADF出力では中心波長 λ_s のOBPFを用いて、信号光パルス成分のみを取り出す。時間シフト量は衝突する制御光パルスの個数によって異なるが、すべてのパルス間隔は $t_0 - \Delta t$ となり、ビットレートを増加させることができる。Fig. 10に原理確認実験の実験系を示す。FLから出射した中心波長1545 nm、繰り返し周波数25 MHzの光パルスを3 dBのOCで分波し、一方を信号光パルス列発生系へ、他方を制御光パルス列発生系へ入射する。両者ともほぼ同一の構成である。まず、1つのパルスを偏波無依存分岐遅延合波器 (Split & Delay Coupler: SDC) で、振幅のそろった複数のパルスに分割する。次に、EDFAを用いて、基本ソリトンの形成に必要な光電力となるようにパルスを増幅し、OBPFを用い

Fig. 9 Schematic diagram of all-optical bit rate converter.

Fig. 10 Experimental setup for all-optical bit rate converter.

Fig. 11 Observed temporal waveforms.

て信号光パルスおよび制御光パルスの中心波長をそれぞれ1545 nm, 1548 nmとする。さらに、可変遅延線 (Variable Delay Line: VDL)を用いて、制御光パルスが信号光パルスの間に位置するように初期位置を調節し、異常分散フラットファイバ (Anomalous Dispersion Flattened Fiber: ADFE)に入射してソリトン衝突を発生させる。ADFEの出力において1545 nmの中心波長をもつOBPFで信号光パルス成分のみを取り出す。Fig. 11にADFE入出力、OBPF出力の時間波形を示す。Fig. 11よりADFE内で完全に衝突を終えて、OBPFで信号光パルスのみを取り出していることがわかる。Fig. 12に入出力での衝突の有無による信号光パルス列の自己相関波形の違いを示す。右の図は左図中の四角の点線で囲む部分の拡大図である。実線は衝突あり、点線は衝突なしの場合を示す。Fig. 12より入出力で信号光パルスの間隔が狭くなっていることがわかる。ソリトン衝突が生じる場合、信号光パ

ルスのビットレート (パルス間隔)は、入力で45.45 Gbit/s (22.00 ps)、出力で47.16 Gbit/s (21.20 ps)であった。よって、1.71 Gbit/s (0.80 ps)のビットレート変換 (時間シフト)を実現できていることがわかる。

6. まとめ

本稿では、まず、SSFSとSC光のフィルタリングを用いた、波長変換機能を有する全光可変遅延線を紹介した。原理確認実験では、パルス幅0.5 ps、中心波長1545 nmの入力パルスに対して、最大15.6 psの遅延量を観測し、Cバンド全域をカバーする1525 nmから1565 nmにわたる波長変換が可能であることを示した。また、パルス圧縮器を前置することにより、10 Gbit/sのPRBS信号に対して、エラーフリーで最大10 psの遅延が得られた。このような広範囲に及ぶ波長変換と光可変遅延線を

Fig. 12 Observed autocorrelation traces.

併用することにより、将来の全光ネットワークにおける光ルータ中でのパケット衝突を大幅に低減することができ、また、大きな分散値を持つより長尺なファイバを用いることで、容易に遅延量を増加させることが可能である。さらに、大きな非線形係数と大きな異常分散値を持つ、低損失かつ分散フラットな光ファイバの開発により、より短尺で大きな遅延量の得られる実用的な可変光遅延線が実現できると期待している。さらに、全光可変遅延線のシステム応用として、ソリトン衝突を用いた全光ビットレート変換器を紹介した。ビットレート 45 Gbit/s 相当の入力パルス列に対して、1.7 Gbit/s のビットレート変換を実現した。このような全光ビットレート変換器を導入することにより、より柔軟な全光ネットワークの設計が可能になると考えている。

謝 辞

本稿で示した成果は、大阪大学大学院工学研究科の大学院生であった小田 祥一郎博士と国広 隆志氏、加納 知周氏、および大学院生の富岡 省吾氏の協力によって得られたものである。記して、感謝いたします。また、パルス圧縮用 CPF を貸与いただいた古河電気工業(株)に感謝いたします。

参考文献

- 1) K. Y. Song, M. G. Herraiez, and L. Thevenaz: Opt. Express **13** (2005) 82.
- 2) J. E. Sharping, Y. Okawachi, and A. L. Gaeta: Opt. Express **13** (2005) 6092.
- 3) D. Dahan and G. Eisenstein: Opt. Express **13** (2005) 6234.
- 4) T. Kunihiro, A. Maeda, S. Oda, and A. Maruta: Opt. Express **14** (2006) 11736.
- 5) J. E. Sharping, Y. Okawachi, J. van Howe, C. Xu, Y. Wang, A. E. Willner, and A. L. Gaeta: Opt. Express **13** (2005) 7872.
- 6) J. van Howe and C. Xu: Opt. Express **13** (2005) 1138.
- 7) Y. Okawachi, J. E. Sharping, C. Xu, and A. L. Gaeta: Opt. Express **14** (2006) 12022.
- 8) S. Oda and A. Maruta: Opt. Express **14** (2006) 7895.
- 9) A. Al Amin, K. Shimizu, M. Tanaka, T. Tanemura, R. Inohara, K. Nishimura, Y. Horiuchi, M. Usami, Y. Takita, Y. Kai, Y. Aoki, H. Onaka, Y. Miyazaki, T. Miyahara, T. Hatta, K. Motoshima, T. Kagimoto, T. Kurobe, A. Kasukawa, H. Arimoto, S. Tsuji, H. Uetsuka, and Y. Nakano: Proc. the European Conference on Optical Communication (ECOC), Cannes, France (2006) PD Th4.1.6.
- 10) K. Onohara, Y. Awaji, N. Wada, F. Kubota, and K. Kitayama: IEEE Photon. Technol. Lett. **17** (2004) 627.
- 11) 加納 知周, 富岡 省吾, 国広 隆志, 丸田 章博: 電子情報通信学会光通信システム研究会 (2008) OCS-2008-79.
- 12) A. Hasegawa and Y. Kodama: Solitons in optical communications, Chapter 5, Oxford University Press, Oxford (1995).
- 13) F. M. Mitschke and L. F. Mollenauer: Opt. Lett. **11** (1986) 659.
- 14) J. P. Gordon: Opt. Lett. **11** (1986) 662.
- 15) T. Kanou, T. Kunihiro, and A. Maruta: Proc. OSA Topical Meeting on Slow and Fast Light, Boston, Massachusetts, USA (2008) SMC4.
- 16) T. Inoue, Y. Taniguchi, J. Hiroishi, T. Yagi, and Y. Mimura: Proc. the European Conference on Optical Communication (ECOC), Berlin, Germany (2007) PO-013.
- 17) 鈴木 昌弘, 植之原 裕行: 電子情報通信学会通信ソサイエティ大会 (2007) B-12-2.

レーザーワード

光ソリトン自己周波数シフト効果 (soliton self-frequency shift)

石英系光ファイバのラマン利得は、ポンプ光の周波数に対して周波数が低くなるに従って増加し、約 13 THz 低い周波数で最大となる。一方、光パルスのパルス幅が狭くなるに従ってスペクトル幅が広がり、誘導ラマン効果によって、単一パルス内で、高周波側のスペクトル成分がポンプ光となって、低周波側のスペクトル成分を増幅し、光パルスの搬送波周波数が低周波側にシフトする現象が観測される。この現象を自己誘導ラマン効果という。特に、分散値が一定の異常分散ファイバ中を伝搬す

る光ソリトンパルスの場合には、パルス形状を保持したままで、ピーク電力の 2 乗および伝搬距離に比例して、その中心周波数が低周波側にシフトする。この現象を光ソリトン自己周波数シフト効果という。さらに、異常分散性を介して周波数シフトが時間位置のシフトに変換され、ピーク電力の 2 乗および伝搬距離の 2 乗に比例した時間遅れが生じる。この効果は、パルス幅が数ピコ秒以下の場合に顕著となる。

(丸田 章博)